

УДК 623.438

Смоляков В.А., Кудров В.М., Михедькин Н.В., Переяслов А.С., Ревенко Г.В.,
Климов В.Ф.

ПРИМЕНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ВГМ

Актуальность проблемы. В настоящее время, несмотря на ряд проведенных усовершенствований пусковых устройств существует проблема надежного пуска танковых дизельных высокофорсированных двухтактных двигателей с турбонаддувом при отрицательных температурах окружающего воздуха. Ухудшение пусковых качеств высокофорсированных дизелей происходит из-за увеличения параметров турбонаддува и уменьшения степени сжатия воздуха в цилиндрах.

Для пуска двигателя необходимо его коленчатые валы (КВ) привести во вращение от постороннего источника энергии. Более того, частота вращения КВ должна быть доведена до некоторой величины, обеспечивающей удовлетворительное протекание процессов смесеобразования и воспламенения топливовоздушной смеси. При этом пусковая частота вращения КВ должна быть минимальной для уменьшения мощности пусковых устройств. Пусковая частота вращения зависит от способа смесеобразования, от температуры всасываемого воздуха и температуры двигателя, а также от его типа и конструктивных особенностей, степени изношенности деталей и т.п.

Минимальная пусковая частота вращения КВ для дизеля значительно выше, чем для карбюраторных двигателей, вследствие особенностей смесеобразования и воспламенения топлива. Для самовоспламенения топлива должна быть обеспечена высокая степень сжатия топливовоздушной смеси в цилиндрах.

При низкой частоте вращения КВ происходит утечка воздуха через неплотности поршневых колец и повышенная отдача теплоты в стенки цилиндров вследствие большей продолжительности цикла. При низкой температуре заряда понижается температура конца процесса сжатия, заряд не нагревается при впуске, а, наоборот, охлаждается холодными стенками цилиндра во время процесса сжатия. При медленном движении плунжера топливного насоса ухудшается распыление топлива, чему также способствует повышенная вязкость холодного топлива.

Существенным требованием для военной техники является необходимость обеспечения пуска холодного двигателя при температурах до минус 25 °С без предварительного разогрева масла и охлаждающей жидкости и до минус 40 °С с использованием специальных мероприятий и устройств для облегчения пуска двигателя с минимальными затратами времени на подготовку к пуску.

Основная часть. Для облегчения и ускорения пуска двигателя осуществляются мероприятия, обеспечивающие интенсификацию физико-химической подготовки горючей смеси к ее воспламенению и уменьшение момента сопротивления прокручиванию КВ двигателя:

1. Обогащение смеси за счет увеличения подачи топлива в 1,8–2,5 раза, осуществляемое с помощью специальных автоматических устройств в топливных насосах высокого давления двигателя;
2. Подогрев воздуха на впуске с помощью электронагревателей (свечей подогрева) или с помощью автономного факельного подогревателя;

3. Установка свечей накаливания с закрытым нагревательным элементом в камерах сгорания;

4. Применение легковоспламеняющихся пусковых жидкостей (этиловый эфир, легкокипящий бензин с добавками минерального масла);

5. Предпусковой нагрев охлаждающей жидкости и моторного масла с помощью подогревателя;

6. Впрыск масла в цилиндры двигателя перед пуском двигателя;

7. Использование нагревателей масла, встраиваемых в моторный и трансмиссионный масляные баки;

8. Применение обогревных аккумуляторных батарей (АКБ) и термоизоляция отсеков АКБ, увеличение количества АКБ;

9. Применение маловязких моторных и трансмиссионных масел с высоким значением индекса вязкости.

Внешний момент, прилагаемый к КВ двигателя в начале пуска (момент страгивания КВ с места), должен быть больше суммарного момента сопротивления прокручиванию коленвалов. После начала вращения КВ внешний момент может быть меньше, т.к. недостающий момент создается в результате изменения кинетической энергии движущихся масс двигателя.

Принудительное вращение коленвалов двигателя при его пуске связано с преодолением следующих моментов:

– M_T – момента сил трения поршней в цилиндрах, коленвалов в подшипниках (включая момент, необходимый для привода всех навесных агрегатов двигателя). Момент сил трения M_T зависит от вязкости моторного масла, конструктивных особенностей двигателя и его технического состояния;

– $M_{\text{ц}}$ – момента, создаваемого при сжатии воздуха в цилиндрах двигателя (учитывается только в течение первых оборотов коленвалов и не зависит от температуры);

– $M_{\text{и}}$ – момента тангенциальных сил инерции вращающихся масс при разгоне двигателя (зависит от размеров вращающихся масс двигателя, уменьшается по мере разгона).

Величина суммарного момента сопротивления вращению $M_{\text{св}}$, который преодолевается стартером ($M_{\text{св}} = M_T + M_{\text{ц}} + M_{\text{и}}$), определяется главным образом величиной момента сил трения, значение которого после первых десяти оборотов КВ составляет 85% величины суммарного момента.

Момент сил трения, в свою очередь, зависит от частоты вращения КВ двигателя и кинематической вязкости применяемого моторного масла. Сопротивление трению при пуске холодного двигателя значительно выше, чем при его работе.

Значение кинематической вязкости применяемых зимних и летних моторных и трансмиссионных масел в зависимости от температуры изменяется в широких пределах (см. таблицу 1):

Существует эмпирическое выражение для вычисления момента сопротивления вращению коленвалов танкового двигателя в зависимости от частоты вращения и температуры масла:

$$M_o = 2477 \cdot \nu^{0,33} \cdot n_{\text{КВ}}^{0,25}, \quad (1)$$

где M_o – момент сопротивления вращению КВ двигателя, Н·м; ν – кинематическая вязкость применяемого моторного масла при соответствующей температуре, мм²/с; $n_{\text{КВ}}$ – частота вращения КВ двигателя, мин⁻¹.

Таблица 1

Температура, °С	Кинематическая вязкость летних и зимних масел, $\times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$			
	«Галол» М-4042ТД	МТ-8П	М8В ₂ С	ТСЗп8
+100	16	8,2	8	7,7
+40	300	83	75	37
+30	500	102	130	43
+20	700	190	250	105
+10	1900	480	300	230
+5	2400	810	390	340
0	3400	1028	457	410
-10		2850	800	830
-20		12000	1450	2240
-25			2730	3990
-30			3980	5750
-40			16500	

Электрическая мощность, необходимая для преодоления этого момента сопротивления при электростартерном прокручивании КВ двигателя вычисляется по формуле:

$$P_o = M_o \cdot n_{\text{п}} / (9,74 \cdot 10^3 \cdot \eta_{\text{п}}), \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $n_{\text{п}}$ – пусковая частота вращения КВ двигателя; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент полезного действия передачи от стартера к КВ двигателя.

Значения моментов сопротивления вращению и мощностей, необходимых для преодоления этих моментов сопротивления, рассчитаны по указанным формулам и приведены в таблице 2.

Использование маловязкого зимнего моторного масла М8В₂С позволяет при температуре минус 25 °С получить такие же значения моментов сопротивления вращению как при плюс 5 °С в случае использования летнего масла «Галол» М-4042ТД.

Таблица 2

Температура, °С	Пусковая частота вращения коленвалов двигателя, $n_{\text{п}} \text{ мин}^{-1}$					
	100		200		300	
	$M_o, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$P_o, \text{ кВт}$	$M_o, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$P_o, \text{ кВт}$	$M_o, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$P_o, \text{ кВт}$
Летнее моторное масло «Галол» М-4042ТД						
+100	205	2,4	245	5,6	270	9,2
+40	540	6,2	645	14,7	710	24,3
+30	635	7,3	755	17,2	835	28,6
+20	710	8,1	850	19,4	940	32,2
+10	990	11,3	1175	26,8	1300	44,5
+5	1120	12,8	1275	29,0	1410	48,2
Зимнее моторное масло М8В ₂ С						
0	620	7,1	735	16,8	815	27,9
-10	745	8,5	880	20,1	980	33,5
-20	910	10,4	1080	24,6	1200	41,0
-25	1120	12,8	1330	30,3	1470	50,3
-30	1260	14,4	1500	34,2	1660	56,8
-40	2020	23,0	2400	54,7	2660	91,0

Существуют различные способы пуска двигателей военной техники, в частности, для пуска танковых двигателей используется электростартерный и воздушный способы пуска.

Система пуска сжатым воздухом применяется на четырехтактных и двухтактных двигателях в качестве дополнительной (дублирующей) системы. Преимущество воздухопуска – возможность создания большого пускового момента. Недостатки – необходимость наличия компрессора, воздушных баллонов, воздухораспределителя, редукционного клапана, трубопроводов, предохранительных и пусковых клапанов, манометров и другой аппаратуры. Кроме того, значительное охлаждение пускового воздуха при расширении может вызвать появление трещин в нагретых деталях камеры сгорания при пуске горячего двигателя и затрудняет воспламенение топлива при пуске холодного двигателя. Воздухопуск применяется для пуска танкового дизеля при температуре охлаждающей жидкости выше плюс 50 °С.

Основным способом пуска двухтактных пяти- и шестицилиндровых дизелей жидкостного охлаждения с газотурбинным наддувом типа 5ТДФМ, 6ТД-1, 6ТД-2, которыми комплектуются современные танки, является электростартерный способ пуска. При таком способе пуска стартер-генератор СГ-18-1С, потребляющий энергию от 4-х АКБ типа 12СТ-85, преодолевает момент сопротивления двигателя и раскручивает его коленчатые валы до частоты вращения (100...240) мин⁻¹ (в зависимости от температуры).

Дополнительной нагрузкой для стартера, а следовательно и для АКБ, является неотключаемая на время пуска двигателя трансмиссия. Применение маловязких масел в системах смазки дизеля и трансмиссии, откачка масла из трансмиссии позволяют уменьшить момент сопротивления прокручиванию, однако при отрицательных температурах характеристики свинцово-кислотных АКБ снижаются и эффективность электростартерного пуска падает. С одной стороны уменьшается энергия, получаемая стартером от АКБ, а с другой стороны увеличивается момент сопротивления вращению, поэтому электростартерный привод не может раскрутить КВ до пусковой частоты вращения. Применение электростартерного способа пуска в сочетании с воздухопуском и вышеперечисленными методами облегчения пуска для пуска двухтактных танковых двигателей при температурах ОЖ и масла ниже минус 25 °С не всегда приводят к пуску двигателя. Комбинированный пуск предполагает 2-х или 3-х ступенчатое подключение стартера к АКБ с включением воздухопуска по разработанной циклограмме в зависимости от частоты вращения КВ. Пусковая частота вращения при таких температурах достигается после (10...15) с прокрутки и в случае неудачного пуска для повторной попытки пуска двигателя из холодного состояния энергии АКБ может быть недостаточно. Поэтому успешный пуск двигателя напрямую зависит от степени заряженности и остаточной емкости АКБ.

Использование обогреваемых АКБ, применение электрических нагревателей масла в маслобаках и установка насосов для его прокачки требует дополнительного расхода энергии, поэтому приемлемо только при наличии внешнего источника питания.

Двигатели 5ТДФМ, 6ТД-1, 6ТД-2 комплектуются стартером-генератором СГ-18-1С и редуктором, имеющим передаточное число 8,48, выбранное в результате расчетно-экспериментальных исследований с учетом вольтамперных характеристик (ВАХ) АКБ 12СТ-85.

Передаточное число между валом стартера и КВ двигателя выбирается таким, чтобы при вращении КВ с пусковой частотой вращения величина тока стартера составляла не более 2/3 максимального тока при полном торможении, а крутящий момент стартера (с учетом КПД редуктора) превышал бы момент сопротивления двигателя.

Стартер-генератор СГ-18-1С – электрическая машина постоянного тока параллельного возбуждения в генераторном режиме и последовательного возбуждения в стартерном режиме.

В электродвигателях последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря, а поэтому момент вращения на его валу пропорционален току якоря в соответствии с выражением

$$M_{\text{ст}} = c \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якоря; Φ – магнитный поток одной пары полюсов; $c = p \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a)$ – постоянный для данного двигателя коэффициент; p – число пар полюсов; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; N – число проводов обмотки якоря.

Электродвигатели последовательного возбуждения имеют большой пусковой момент и большую перегрузочную способность т.к. имеют механическую характеристику, при которой с уменьшением частоты вращения растет момент вращения на валу.

Одним из основных требований к пускорегулирующей аппаратуре является соблюдение условия – момент вращения стартера, приведенный к КВ двигателя должен быть больше момента сопротивления вращению КВ двигателя:

$$M_{\text{ст пр}} > M_{\text{св}}. \quad (4)$$

Стартерные рабочие характеристики СГ-18-1С, соответствующие ВАХ комплекта из 4-х АКБ 12СТ-85 при 100 % заряженности и температуре электролита плюс 25 °С приведены на рисунке:

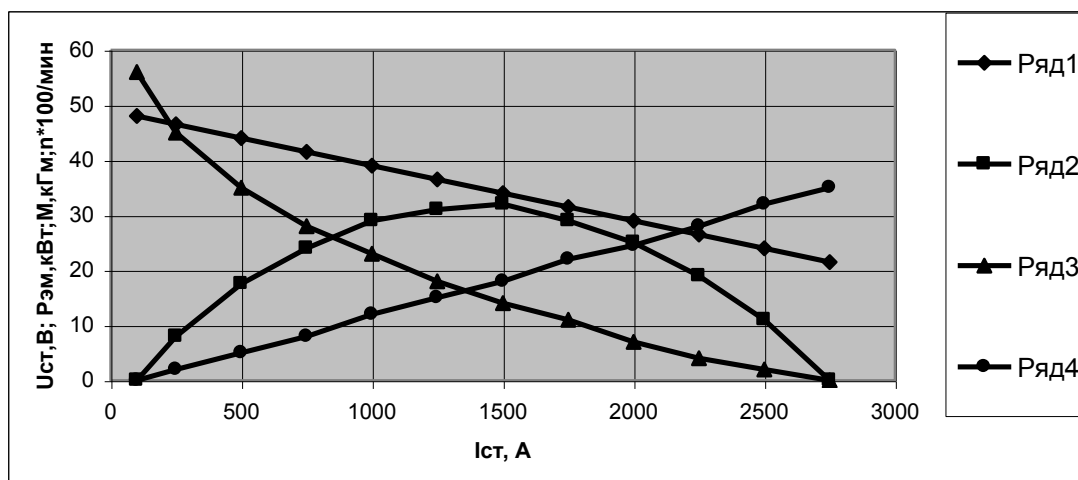


Рисунок – Стартерные рабочие характеристики стартера-генератора СГ-18-1С
 ряд 1 – $U_{\text{ст}}$ – напряжение на клемме стартера, В; ряд 2 – $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность стартера, кВт; ряд 3 – n – частота вращения вала стартера, мин^{-1} ; ряд 4 – $M=M_{\text{ст}}$ – электромагнитный момент стартера, кГм; $I_{\text{ст}}$ – ток якоря стартера, А

Максимальная величина тока якоря СГ-18-1С при полном торможении может достигать (2500...2750) А, вращающий момент на его валу при этом превышает 250 Н·м, что с учетом передаточного отношения редуктора (8,48) и его КПД (0,9) соответствует моменту вращения на выходном валу редуктора (1800...1900) Н·м.

При попарнопараллельно-последовательном соединении АКБ (48В) в процессе пуска двигателя номинальный стартерный ток группы АКБ составляет 800 А, т.е. даже при двойной перегрузке 100 % заряженных АКБ возможности стартера используются только на (60...70) %. Если же степень заряженности АКБ менее 75 % зимой или 50 %

летом электростартерный пуск двигателя невозможен т.к. комплект АКБ не может обеспечить стартерный ток (1500 ± 100) А, соответствующий максимальной мощности стартера-генератора СГ-18-1С. Особенно большим перегрузкам подвергаются АКБ при страгивании КВ холодного двигателя, при котором величина тока стартера практически равна току короткого замыкания АКБ. Это приводит к сокращению срока службы АКБ. При температуре электролита АКБ минус 40°C величина тока короткого замыкания уменьшается в три раза по сравнению с величиной тока короткого замыкания этих же АКБ при температуре электролита плюс 25°C . Соответственно снижаются и стартерные характеристики СГ-18-1С.

При электростартерной прокрутке КВ двигателя 6ТД-1 величина тока стартера превышает 1000А при напряжении (30...36) В т.е. мощность, потребляемая стартером от АКБ составляет (30...36) кВт и каждую секунду расходуется энергия (30...36) кДж. В среднем, длительность работы стартера при пуске двигателя составляет 10 с, следовательно на один пуск расходуется энергия величиной примерно 400 кДж.

Таким образом, в связи с повышением мощности танковых двигателей, а как следствие, повышением и момента сопротивления при прокрутке возникла проблема дефицита энергии для пуска двигателя. Простое увеличение количества АКБ, возимых на борту, приводит к увеличению габаритов аккумуляторного отсека в танке, что нерационально для модернизации танков типа Т-54, Т-55, Т-62, Т-64, Т-72, Т-80. Однако, учитывая то, что проблема дефицита энергии на танке имеет кратковременный (импульсный) характер и возникает при необходимости ускоренного гарантированного пуска дизельного двигателя, а также при движении танка по пересеченной местности со всеми включенными потребителями и при работе КУО на крене – эта проблема может быть решена путем использования емкостных накопителей энергии (ЕНЭ).

В настоящее время разработаны и успешно применяются для пуска дизельных двигателей мощностью до 442 кВт (600 л.с.) пусковые устройства на базе молекулярных емкостных накопителей энергии. Они имеют номинальный энергозапас (150...200) кДж при напряжении 24 В, однако из-за значительных весогабаритных характеристик могут использоваться только в местах постоянной дислокации техники, на стоянках для внешнего пуска двигателей.

Преимущества молекулярных емкостных накопителей энергии:

- длительный срок службы (100000 циклов заряд-разряд в течение 15 лет);
- малое внутреннее сопротивление;
- малое время заряда-разряда;
- большая удельная мощность;
- большой разрядный ток;
- пожаровзрывобезопасность и герметичность (отсутствие вредных выделений);
- не требуют обслуживания.

Недостатки молекулярных емкостных накопителей энергии:

- высокая стоимость;
- малая удельная энергия;
- зависимость величины отдаваемой на нагрузку энергии от температуры (при отрицательных температурах количество отдаваемой на нагрузку энергии уменьшается, но в меньшей степени, чем у АКБ).

Сравнительные характеристики ЕНЭ и свинцово-кислотных АКБ типа 12СТ-85 приведены в таблице 3:

Таблица 3

Характеристика	Молекулярные ЕНЭ	Свинцово кислотные АКБ
Внутреннее сопротивление	0,001...0,003 Ом	0,015...0,025 Ом
Разрядный ток	до 10000 А	400 А (макс. 1000А)
Удельная энергия	1...2 Дж/см ³	200...500 Дж/см ³
Удельная мощность	5...7 кВт/кг	0,3...0,5 кВт/кг
Время заряда (разряда)	5...10 мин (5...10 с)	10 час (от 0,1 до 100 час)
Саморазряд	1 В/ч	0,5 % /сут
Срок эксплуатации	15 лет или 100000 циклов заряд-разряд	3 года
Обслуживание	не требуется	требуется
Стоимость	ЕНЭ типа 24ПП-50/0,002 600\$/шт.	АКБ типа 12СТ-85 200\$/шт.
Диапазон температур	минус 50°С... плюс 50°С	минус 40°С... плюс 60°С

Энергозапас ЕНЭ, сопоставимых по габаритам с танковыми АКБ составляет (80...120) кДж, ёмкость 280 Ф, масса в полтора-два раза меньше массы АКБ.

Малое внутреннее сопротивление ЕНЭ и большие разрядные токи позволяют использовать их для уменьшения нагрузки на основной источник питания – АКБ в пусковых режимах работы ВГМ. Для исследования возможности использования ЕНЭ в системе электростартерного пуска бронетанковой техники были избраны и испытаны молекулярные ЕНЭ типа 24ПП-50/0,002 российского производства номинальной емкостью 190 Ф. Максимальный энергозапас указанного ЕНЭ достигается при напряжении 30 В и составляет 80 кДж (при напряжении 24 В запас энергии составляет 50 кДж). Объем накопителя типа 24ПП-50/0,002 в 1,4 меньше объема АКБ 12СТ-85, масса не превышает 35 кг. Габаритные размеры накопителя: (465 х 176 х 252) мм.

Цель испытаний – определение оптимальных зарядных и разрядных характеристик ЕНЭ, исследование возможности использования ЕНЭ совместно с АКБ типа 12СТ-85 применительно к танку с двухтактным шестицилиндровым дизельным двигателем жидкостного охлаждения типа 6ТД-1.

ЕНЭ заряжаются от АКБ, и следовательно, для экономного расходования энергии АКБ, величина зарядного тока должна быть минимально возможной, однако при этом значительно увеличивается время заряда ЕНЭ. В результате исследований определен оптимальный диапазон зарядных токов (30...50 А) при котором ЕНЭ заряжаются от АКБ с 0 до 24 В в течение (2...3) мин. Такое время заряда и величина зарядного тока приемлемы для предпусковой подготовки двигателя танка.

Важное значение имеет электрическая схема подключения ЕНЭ к системе электростартерного пуска двигателя. Для проведения испытаний в составе танка были предложены два варианта схемы подключения:

1-й вариант: к стартерной цепи СГ-18-1С при помощи реле стартера-генератора подключались соединенные последовательно группа из двух штатных АКБ и группа из двух заряженных ЕНЭ. При такой схеме подключения ЕНЭ не могут сформировать мощный импульс тока из-за большого внутреннего сопротивления АКБ (внутреннее сопротивление АКБ на порядок выше, чем внутреннее сопротивление ЕНЭ) и, следовательно, суммарный ток 2-х ЕНЭ, подаваемый на стартер, равен суммарному току 2-х АКБ. При такой схеме подключения за 5 с прокрутки расходуется вся запасенная двумя ЕНЭ энергия (100 кДж) т.е. ЕНЭ разряжаются полностью.

2-й вариант: к стартерной цепи СГ-18-1С при помощи реле стартера-генератора подключались две соединенные последовательно группы из одной штатной АКБ и одного заряженного ЕНЭ, соединенных параллельно. Такая схема подключения перспективна, позволяет облегчить режим работы АКБ при страгивании коленвалов, однако

энергия, отдаваемая ЕНЭ (30...60 %), зависит от степени заряженности и остаточной емкости АКБ. Чем слабее АКБ, тем больше энергии отдают ЕНЭ и наоборот.

В процессе испытаний ЕНЭ при положительных и отрицательных температурах было выявлено, что номинального энергозапаса двух накопителей типа 24ПП-50/0,002 недостаточно для гарантированного электростартерного пуска двигателя, но для уменьшения экстремальных нагрузок на штатные АКБ в процессе электростартерного пуска двигателя – достаточно. Поэтому дальнейшие работы в указанном направлении с ЕНЭ увеличенной ёмкости являются перспективными.

Для защиты АКБ от воздействия больших стартерных токов наиболее предпочтительной является циклограмма комбинированного пуска, при которой энергия АКБ будет использоваться для заряда ЕНЭ перед пуском и для питания потребителей в процессе предпусковой подготовки, пуска. А пуск двигателя необходимо выполнять с помощью сжатого воздуха и электростартера, подключаемого к последовательно соединённым ЕНЭ увеличенной ёмкости. Известно (и подтверждается осциллограммами пусков), что коленчатые валы начинают вращаться не мгновенно после подключения стартера к источнику энергии, а через некоторое время (0,1...0,2 с) в течение которого идет ток короткого замыкания стартера (2000...2750 А). При этом расходуется энергия ЕНЭ и АКБ около 10 кДж.

Причина этого явления в значительном превышении механической постоянной времени (инерционности) системы стартер – привод – КВ над постоянной времени электрической цепи АКБ (ЕНЭ) – стартер, что приводит к уменьшению КПД системы электростартерного пуска при непосредственном включении стартера на максимальное напряжение источника питания.

Для страгивания КВ двигателя предлагается использовать систему воздухопуска путем включения ее на (0,1...0,2) с перед подачей на стартер полного напряжения (48 В) от АКБ (ЕНЭ). При этом отключение клапана воздухопуска и подключение напряжения 48 В к стартеру-генератору необходимо производить по сигналу датчика частоты вращения КВ двигателя.

В процессе испытаний ЕНЭ совместно с АКБ в составе танка было установлено, что пусковой частоты вращения КВ (200...240) мин⁻¹, недостаточно для устойчивого горения топлива в цилиндрах двигателя и гарантированного пуска. Увеличение пусковой частоты вращения КВ при электростартерной прокрутке до 290 мин⁻¹ может быть достигнуто путем уменьшения передаточного числа редуктора, установленного между валом стартера и КВ двигателя с 8,48 до 7,0, однако связано с конструктивными изменениями редуктора и двигателя в целом.

Частота вращения КВ при существующем передаточном числе может быть увеличена, если в процессе электростартерной прокрутки параллельную (шунтовую) обмотку СГ-18-1С подключать к бортовой сети. При этом стартер-генератор превращается в электромашину смешанного возбуждения, механическая характеристика которой занимает промежуточное положение между механическими характеристиками электродвигателей параллельного и последовательного возбуждения. Величина тока, потребляемого стартером-генератором от АКБ, увеличится незначительно, т.к. сопротивление параллельной (шунтовой) обмотки возбуждения стартера-генератора на два порядка больше, чем сопротивление его якорной обмотки.

Другим путем повышения пусковой частоты вращения является увеличение напряжения, подаваемого на клеммы стартера-генератора в процессе пуска.

Максимальное рабочее напряжение ЕНЭ составляет 30 В, что позволит при последовательном соединении накопителей в процессе пуска получить на клеммах стартера 55...60 В. Заряжать ЕНЭ перед пуском двигателя до максимального напряжения 30 В предполагается от 2-х АКБ, соединённых последовательно. Для переключения заряженных ЕНЭ с параллельного на последовательное соединение и подключения к стартеру-генератору возможно использование дополнительного реле стартера-

генератора. В этом случае АКБ должны подключаться к стартеру-генератору с помощью штатного РСГ когда напряжение на стартере уменьшится с 60 до 30 В и отключаться после пуска двигателя. Если запасенной накопителями энергии будет достаточно для пуска двигателя, то подключения АКБ к стартеру не требуется. ЕНЭ заряжаются от АКБ непосредственно перед пуском двигателя, а при работающем двигателе и в процессе движения подключаются параллельно АКБ и подзаряжаются от генератора. Емкость ЕНЭ в течение срока службы уменьшается незначительно.

Необходимо отметить, что на предприятии-изготовителе ЕНЭ ведутся работы по улучшению параметров серийных ЕНЭ и уменьшению стоимости их производства, разрабатываются новые ЕНЭ увеличенной ёмкости. ЕНЭ герметичны и пожаровзрывобезопасны поэтому для повышения эффективности ЕНЭ в условиях отрицательных температур возможно использование электрообогревателей.

Сколько же необходимо энергии для электростартерного пуска танкового двигателя с помощью двух ЕНЭ?

Расчет энергии и ёмкости, необходимой для пуска двухтактного двигателя 6ТД-1 серийного танка Т-80УД

Исходными данными для расчета принимается момент сопротивления 1330 Н·м, соответствующий пусковой частоте вращения КВ двигателя 200 мин⁻¹ при температуре минус 25 °С (см. табл. 2).

1. Вычисляется мощность сопротивления электростартерному прокручиванию КВ двигателя

$$P_o = M_o n_n / (9,74 \cdot 10^3 \cdot \eta_n) = 1330 \cdot 200 / (9,74 \cdot 10^3 \cdot 0,9) = 30,3 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 30,3 \text{ кВт},$$

где M_o – момент сопротивления двигателя на пусковой частоте вращения 200 мин⁻¹ при температуре зимнего моторного масла минус 25 °С; n_n – пусковая частота вращения КВ двигателя, мин⁻¹; η_n – коэффициент полезного действия передачи от стартера к КВ двигателя.

2. Напряжение группы АКБ (ЕНЭ) определяется по напряжению стартера, при котором обеспечивается его гарантированная номинальная мощность. Для стартера-генератора типа СГ-18-1С напряжение составляет 48 В в соответствии с его ВАХ:

$$U = 48 - 0,018 \cdot I_{ст},$$

следовательно, АКБ (ЕНЭ) при пуске должны переключаться с параллельного (24 В) на последовательное (48 В) соединение.

3. Определяется ток стартера, соответствующий его максимальной мощности, по формуле:

$$I_{ст} = 2 \cdot P_o \cdot 10^3 / 48 \cdot \eta_{ст} + I_{хх} / 2 = 2 \cdot 30,3 \cdot 10^3 / 48 \cdot 0,85 + 120 / 2 = 1545 \text{ А},$$

где $\eta_{ст}$ – магнито-механический КПД стартера-генератора СГ-18-1С; $I_{хх}$ – ток холостого хода стартера-генератора СГ-18-1С.

4. Вращающий момент стартера, соответствующий этой величине тока определяется по характеристике стартера $M_{ст} = f(I_{ст})$ и составляет $M_{ст} = 20 \text{ кГм} = 196 \text{ Н·м}$.

5. Передаточное отношение привода определяется по формуле:

$$i = M_o / M_{ст} \cdot \eta_n = 1330 / 196 \cdot 0,9 = 7,54$$

6. Определяется энергия, расходуемая на прокрутку КВ в течение $t_{ст} = 15 \text{ с}$ (максимальное время работы стартера-генератора СГ-18-1С в стартерном режиме):

$$Q_{\Sigma} = P_o \cdot t_{ст} = 30,3 \cdot 15 = 455 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 455 \text{ кДж}.$$

7. Для прокрутки КВ двигателя в течение 15 с от двух последовательно соединенных накопителей суммарная ёмкость ЕНЭ должна быть не менее:

$$C_{\Sigma} = 2 \cdot Q_{\Sigma} / U_n^2 \cdot m^2 = 2 \cdot 455 \cdot 10^3 / 24^2 \cdot 2^2 = 395 \text{ Ф},$$

где U_n – номинальное напряжение одного ЕНЭ; m – количество ЕНЭ.

Использование в составе танка двух ЕНЭ ёмкостью 395Ф позволит выполнять электростартерный пуск двигателя от последовательно соединённых ЕНЭ без подключения АКБ к стартеру.

Каждый ЕНЭ при заряде от нуля до номинального напряжения 24 В в течение 3 мин током 50 А расходует ёмкость АКБ в количестве 2,5 А·ч, т.е. на заряд двух ЕНЭ требуется около 5 А·ч. В этом случае количество штатных АКБ может быть сокращено до двух штук, что позволит уменьшить расходы на обслуживание АКБ. Максимальная ёмкость АКБ при этом уменьшится с 340 А·ч до 170 А·ч, однако запаса энергии двух АКБ достаточно для заряда двух ЕНЭ перед пуском, проведения предпусковой подготовки двигателя и для работы агрегатов (МЗН, БЦН, АФП, МВП) обеспечивающих пуск двигателя.

По данным предприятия-изготовителя, ЕНЭ имеют длительный период эксплуатации (до 15 лет) и не требуют обслуживания, что с избытком компенсирует более высокую стоимость ЕНЭ (600 \$/шт.) по сравнению с АКБ (200 \$/шт.). Средний срок эксплуатации танковых АКБ не превышает 3-х лет при регулярном техническом обслуживании.

Выводы

1. Применение молекулярных ёмкостных накопителей энергии в системах пуска двухтактных танковых двигателей позволяет повысить надежность их пуска в условиях низких температур.

2. При использовании в составе танка двух ЕНЭ ёмкостью более 400 Ф каждый количество штатных АКБ может быть уменьшено до двух.

3. Эксплуатация ЕНЭ в танке является более экономически выгодной, чем эксплуатация свинцово-кислотных АКБ.

Литература

1. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей. Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М., «Машиностроение», 1985, 456 с.

2. Электроавтоматика и электрооборудование танков. Под редакцией А.С. Белонковского. –М., Издание академии бронетанковых войск, 1963.

3. Электронные компоненты и системы, №4, 2000.

4. ОСТ в3-4055-78 Методы расчета основных энергетических показателей систем электроснабжения специальных гусеничных машин, 1978.

Смоляков В.А., Кудров В.М., Міхедькін М.В., Переяслов О.С., Ревенко Г.В.,
Клімов В.Ф.

ВИКОРИСТАННЯ МОЛЕКУЛЯРНИХ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В СКЛАДІ ВГМ

У даній статті розглядається проблема пуску танкового двухтактного дизельного двигуна при негативних температурах повітря та рекомендовано метод її вирішення за допомогою використання молекулярних ємнісних накопичувачів енергії.